

调制泵浦 EDFA 的增益响应与级联放大

唐平生 徐慧俊 刘丹 刘小明 范崇澄 彭江得

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

提要 对调制泵浦掺铒光纤放大器(EDFA)的增益响应与级联放大的实验研究表明,EDFA小信号增益对泵浦光调制的幅度和频率响应分别呈现线性与低通($< 1\text{ kHz}$)特性,级联放大为高通($> 200\text{ Hz}$)特性。

关键词 掺铒光纤放大器, 增益, 调制

1 引言

EDFA 在光纤传输与网络系统中的应用前景为世人所瞩目^[1]。在通常情况下,系统中的 EDFA 工作于连续泵浦且保持恒定增益的状态,并显示其对高速码率、格式和系统升级透明的优异特性。然而,在有些专门应用技术中,需要对 EDFA 的增益施加调制。比如,为确保在线中继放大 EDFA 安全可靠地工作,必须对其工作状态进行远距离实时监控^[2],其可能的技术手段之一,就是通过调制泵浦源,利用附加增益调制在线传输光信号的传输与解调来传送 EDFA 的工作状态信息^[3];在有些场合下,则涉及对低频模拟信号的放大,如光纤传感、光纤时域反射(OTDR)测试系统及 EDFA 参量交流测试等等。

新近,作者对低频调制泵浦 EDFA 的增益响应与级联放大特性进行了实验研究,测得 EDFA 小信号增益对泵浦调制幅度呈线性响应,频率响应呈现低通($< 1\text{ kHz}$)特性,斜率为 10 dB/十倍频程 ,级联放大则表现为高通($> 200\text{ Hz}$)特性。

2 实验装置与方法

EDFA 低频增益调制特性的实验测试装置如图 1 所示。EDFA₁ 和 EDFA₂ 是两个分别采用 980 nm LD 泵浦和 1480 nm LD 泵浦的掺铒光纤放大器^[4],EDFA 参量如表 1 所示。

Table 1 EDFAs' parameters

EDFA	Pumping LD		Erbium-doped fiber					
	Wavelength (nm)	Power (mW)	NA	Cut-off wavelength (nm)	Core diameter (μm)	concentration (ppm)	α (dB/m)	α_p (dB/m)
EDFA ₁	980	20	0.21	925	3.3	200	3.20	5.88
EDFA ₂	1480	25	0.24	1138	3.7	400	4.57	3.29

EDFA 的小信号增益分别为 17 dB 和 25 dB。函数发生器产生幅度与频率连续可调的正弦波, 用来调制 980 nm LD 的驱动电流, 使泵浦功率产生附加的正弦调制, 因而 EDFA₁ 的增益也将获得相应的调制, EDFA₂ 则处于连续泵浦工作状态。

采用中心波长为 1546 nm 带尾纤输出的 DFB LD 作直流信号源。信号光经 EDFA₁ 放大后, 输出光将获得附加的正弦调制, 利用光纤 Fabry-Perot (F-P) 滤波器(带宽 0.8 nm) 滤掉信号谱宽外的绝大部分放大的自发辐射(ASE), 经衰减器(Att. 1) 进入 EDFA₂ 放大。为使光探测器(PIN) 不致饱和, 在探测器前加一衰减器(Att. 2)。锁相放大器(Lock-in) 和电压计(Vol. Meter) 分别用来测量输出调制信号光的交流分量和直流分量。在图 1A 处测量 EDFA₁ 增益调制的幅度和频率响应特性; 在 B 处观测低频调制光信号经 EDFA₂ 放大后的传输特性。

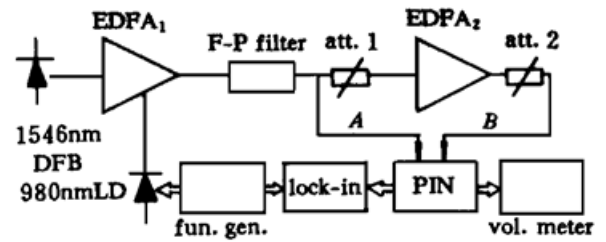


Fig. 1 Experimental configuration for measurement of pump-signal modulation and signal-signal transmission response characteristics

3 实验结果与分析

3.1 增益对泵浦调制幅度的响应特性

实验中先将 EDFA₁ 调节在连续泵浦最佳小信号增益(17 dB) 状态, 然后, 在恒定调制频率(1 kHz) 下, 连续改变泵浦电流调制幅度, 测出 EDFA₁ 输出信号光功率的相应变化。定义调制光功率交流分量和直流分量的比值为调制度, 显然, 输出信号光调制度的变化即反映了

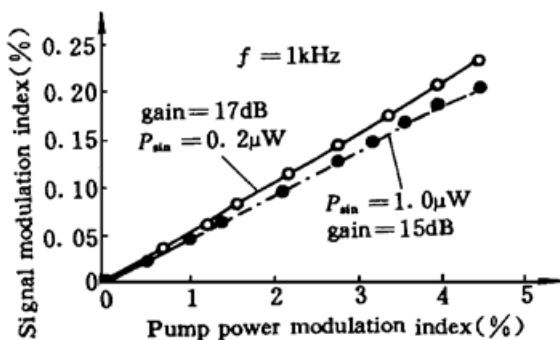


Fig. 2 Signal modulation index vs pump modulation index at a constant frequency (1 kHz)

EDFA 增益的变化。图 2 给出实验测得的泵浦光调制度和 EDFA₁ 输出光调制度的关系曲线。由图可见, 当输入信号光功率为 $0.2 \mu\text{W}$ 时, 随着泵浦光调制度的增大, EDFA 输出光调制度线性增加, 表明 EDFA 处于小信号状态, 即线性工作区。当增大输入信号功率至 $1 \mu\text{W}$ 时, 在连续泵浦下测得增益为 15 dB, 测得输出信号光调制度下降, 且稍偏离线性, 这是因为 EDFA 开始进入饱和工作状态。

3.2 增益对泵浦调制频率的响应特性

保持 EDFA₁ 工作在最佳小信号工作状态, 在恒定泵浦调制幅度下, 从 50 Hz 至 10 kHz 连续改变调制频率, 观测输出信号光功率的变化, 得到输出信号光调制度和泵浦调制频率的关系曲线如图 3(a) 所示。由图可见, 在调制频率 10 kHz 以下范围内, 用双对数坐标表示的频率响应特性近似为直线, 斜率大致为 10 dB/十倍频程, 类似为一阶低通滤波器, 且改变泵浦光的调制度时, 其斜率基本维持不变。这可从物理上解释为, EDFA 增益的频率响应特性应决定于上能级铒离子寿命, 而与泵浦调制幅度无关。对于不同的掺铒光纤, 报道的上能级铒离子寿命值相差甚大, 一般在 0.1~10 ms 范围内^[5], 由图 3(b) 特性曲线确定的 3 dB 带宽相应的截止频率约 1 kHz 左右, 这一截止频率值与铒离子寿命值相吻合。

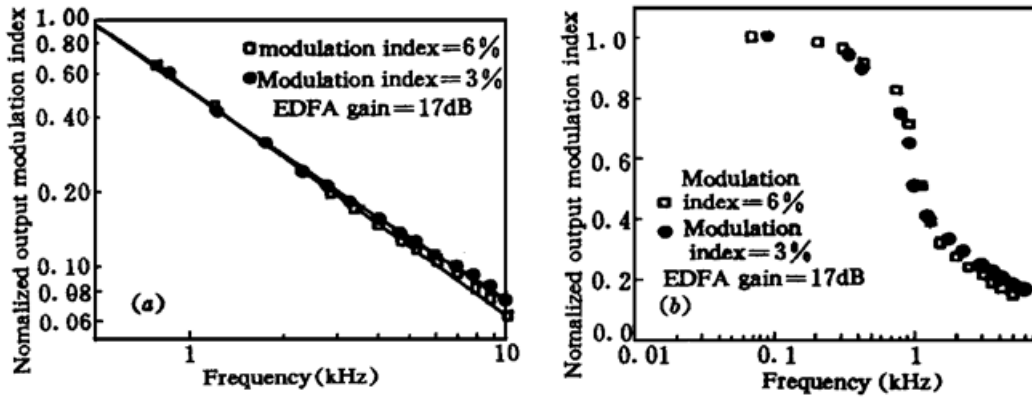


Fig. 3 Normalized output modulation index vs modulation frequency with the pump modulation index being 6% and 3%, respectively

3.3 低频调制信号的增益压缩

将 EDFA₂ 调节在连续泵浦最佳小信号工作状态, 在恒定 EDFA₁ 泵浦调制幅度下, 将 EDFA₁ 输出的低频调制信号光直接送到 EDFA₂ 级联放大, 从 0 到 10 kHz 连续改变 EDFA₁ 泵浦调制频率, 观测 EDFA₂ 输出信号光调制度的变化, 即可得到 EDFA₂ 增益与信号光调制频率的关系。定义输出调制度与输入调制度之比为归一化传输系数 $T(f)$, 图 4 给出用归一化传输系数表示的频率响应特性。从图中可见, 当频率高于 1.5 kHz 后, 其传输系数大于 90%, 或者说 EDFA 的增益在低频端受到压缩。其 3 dB 带宽相应的截止频率约 200 Hz, 亦与上能级铒离子寿命相吻合。

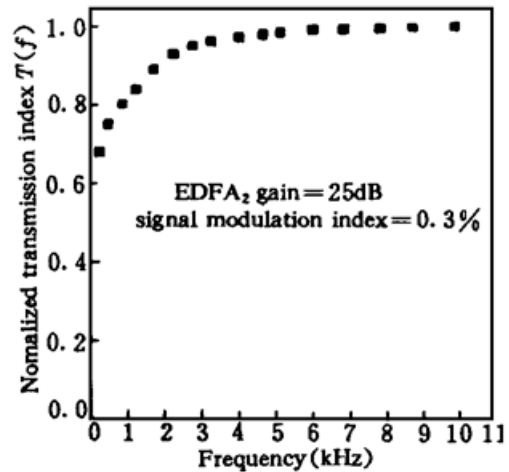


Fig. 4 Normalized transmission index $T(f)$ vs modulation frequency with the EDFAs' gain being 25 dB and the signal modulation index 0.3%

与前述对泵浦调制的频率响应特性相反, EDFA 对调制信号光呈现高通特性。虽然两者都决定于上能级铒离子寿命, 且两者都要求保持尽可能高的反转粒子数, 但两种频率响应过程的物理要求是不同的, 在泵浦调制情况下, 只有在调制周期大于上能级铒离子寿命条件下, 才能将下能级粒子充分激发到上能级; 而对于调制信号的放大则正好相反, 只有当调制周期小于上能级铒离子寿命时, 才能使信号光获得最大的增益。

4 结 论

对低频调制泵浦 EDFA 的增益响应与级联放大特性的实验研究表明: EDFA 小信号增益对泵浦光调制幅度呈线性响应。频率响应呈现低通特性; EDFA 对调制信号光的频率响应则表现为高通特性。对于 EDFA 参量监控应用来说, 由于监控参量的数据量通常在 300 bits 以下, 监测信道的传输数据率低, 故适当增加泵浦光调制度, 用电路补偿高频端响应, 采用频移键控/时分复用技术(FSK/TDM)调制 EDFA 的增益, 选取调制频率介于 2 kHz 至 10 kHz, 传输数据率 2400 bit/s 以上, 可以通过在线信号光传输参量信息来实现对 EDFA 工作状态的监

控。进一步的实验工作正在进行之中。

参 考 文 献

- 1 AT&T Lab. System requirements for terrestrial line systems using in-line OFAs. In the ITU Telecommunication Standardization Sector (ITU-T) SG 15 Meeting, San. Jose. California, 1993. 1~ 2
- 2 AT&T Lab. Supervisory channel for in-line optical fiber amplifiers. in the ITU Telecommunication Standardization Sector (ITU-T) SG 15 Meeting, San. Jose. California, 1993. 3~ 4
- 3 Agellieri, F. Fontana. Low bit-rate service channel for remote monitoring of EDFA in-line repeaters obtained by modulation of the active fiber gains. *Optical Amplifiers and Their Applications*, 1992, **17**: 87 ~ 90
- 4 彭江得, 姜 新, 吴庚生 等. 实用型 1.47 μm LD 泵浦掺 Er^{3+} 光纤放大器模块. 高技术通讯, 1994, **4** (3): 7~ 10

Cascaded Amplification and Gain Response of EDFA with Pump Modulation

Tang Pingsheng Xu Huijun Liu Dan Liu Xiaoming
Fang Chongcheng Peng Jiangde

(*Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084*)

Abstract Gain modulation response and cascaded amplification characteristics of Erbium doped fiber amplifiers (EDFAs) are experimentally studied. It is shown that the amplitude and frequency responses of EDFAs are linear and low-pass (cut-off frequency less than 1 kHz), respectively. The transmission characteristics of the low-frequency modulated line signal are high-pass (cutoff frequency larger than 200 Hz).

Key words EDFA, gain, modulation